

基于 MGWR 模型的轨道站点客流时空影响因素研究 ——以西安地铁 1—6 号线为例

安 东¹, 蔺海娣¹, 陈思美²

(1. 西安市城市规划设计研究院, 陕西 西安 710082; 2. 西安市交通规划设计研究院有限公司, 陕西 西安 710082)

摘要: 为探究轨道站点客流时空分布差异及影响因素, 以西安市地铁 1—6 号线为例, 结合多源数据构建混合地理加权回归 (MGWR) 模型, 定量分析建成环境及用地特征、交通接驳设施及站点自身属性因素对高峰时段进出站客流的影响。结果表明: 西安市轨道站点客流存在显著的空间相关性, 同最小二乘 (OLS) 模型相比, MGWR 模型拟合优度更高, 能够精确刻画客流与各因素的时空影响关系; 公交线路数、居住用地面积、商业用地面积是轨道站点客流的显著影响因素, 受高峰时段和出行行为的影响, 不同变量的回归系数存在明显差异; 各影响因素对客流的影响效果呈现不同程度的空间差异, 对未来轨道交通周边规划设计提供参考。

关键词: 城市轨道交通; 高峰客流; 时空异质性; MGWR 模型

中图分类号: U293.1⁺3

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2023)01-0020-07

Research on temporal and spatial influencing factors of passenger flow at rail stations based on MGWR model: Taking Xi'an Metro Line 1—6 as an example

AN Dong¹, LIN Haidi¹, CHEN Simei²

(1. Xi'an Urban Planning and Design Institute, Xi'an 710082, China;

2. Xi'an Transportation Planning and Design Institute Co. Ltd., Xi'an 710082, China)

Abstract: In order to explore the temporal and spatial distribution differences and influencing factors of passenger flow at rail stations, this paper takes Xi'an Metro Line 1-6 as an example, constructs a mixed geographically weighted regression (MGWR) model combined with multi-source data, and quantitatively analyzes the influences of built environment, land use characteristics, transport access facilities and station attributes on passenger flow in and out of the station during peak hours. The results show that there is a significant spatial correlation in the passenger flow of Xi'an rail stations. Compared with Ordinary Least Square (OLS) model, MGWR model has higher goodness of fit, and can deeply describes the spatiotemporal influence relationship between passenger flow and various factors. Affected by peak hours and travel behavior, the regression coefficients of different variables are significantly different. The effects of various influencing factors on passenger flow show different degrees of spatial differences, which provides a reference for future planning and design of rail transit. Affected by peak hours and travel behavior, the regression coefficients of different variables vary significantly. The effect of each influencing factor on passenger flow shows different degrees of spatial disparity, which provides a reference for the planning and design of the surrounding areas of rail transit in the future.

Key words: Urban rail transit; Peak passenger flow; Spatiotemporal heterogeneity; MGWR model

轨道交通作为诸多大城市解决交通拥堵问题的重要工具, 以高效、便捷、准时、可靠的优势承担了多数居民的交通出行, 为进一步提升轨道

交通服务效益, 合理把握站点客流分布规律及特征, 需深入探究客流在不同层面的时空影响因素。

收稿日期: 2022-06-30

修改稿日期: 2023-01-18

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2016JM5063)

第一作者: 安 东 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事综合交通、轨道交通及交通环境方面的研究. E-mail: 125290635@qq.com

轨道站点客流具有时空非平稳性,同一天内不同时段各站点间进出站客流存在较大区别,体现了不同乘客的出行需求和出行目的,其中,工作日高峰时段客流量能较好地反映这种差异^[1]。

结合既有研究,轨道站点客流影响因素主要分为三大类:建成环境及土地利用、交通衔接设施、站点自身因素^[2-3]。建成环境及土地利用是影响轨道交通出行需求的主要因素^[4-5],指标包括人口及岗位数量、居住用地面积、商业用地面积等;交通衔接设施指标包括路网密度、公交线路等;站点自身属性包括换乘属性、站点区位等。

回归分析是研究站点客流与影响因素的主要方法,从全局的角度进行分析^[6],目前多采用最小二乘(Ordinary Least Square, OLS)回归、逐步回归等传统计量模型。但此类模型未充分考虑到变量的空间异质性,可能存在结果偏差;随着空间分析技术的发展,有学者采用地理加权回归(Geographic Weighted Regression, GWR)为代表的局部变参数模型刻画这种空间特性^[2],但该模型过分强调变量的局部影响,存在一定的限制。因此,为全面考虑变量在空间层面的多样差异,需构建混合地理加权回归(Mixed Geographic Weighted Regression, MGWR)模型,允许部分变量的影响系数在全局范围一致,而其他变量系数有所差异,以期更贴合实际地刻画各因素对客流的时空影响效应。

1 研究范围及变量选取

在掌握西安市地铁 AFC 数据及其他多源数据的基础上,以地铁1—6号线为例,探究轨道站点客流的时空影响因素。

1.1 研究范围

轨道站点周边一定范围内的影响因素会对客流分布规律和特征产生影响,该范围尺度的确定是研究的基础。多位学者对站点合理影响范围开展过分析,主要集中于300~1 000 m之间^[7-8],我国住房和城乡建设部发布的《城市轨道沿线地区规划设计导则》提出轨道影响区为距离站点约500~800 m,步行约15 min以内可达的区域^[9]。本次研究结合西安实际并参考相关文献^[10],选择500 m为轨道站点合理影响范围,具体边界结合步行可达、道路红线、用地边界等对各站点进行合理划分,以保证最大可能地满足实际,以地铁1—6号线为例,划分结果如图1所示。

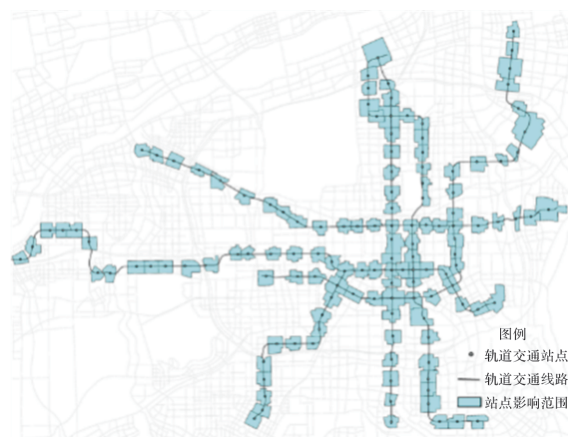


图1 地铁1—6号线站点影响范围划分

Fig. 1 Division of station influence scope for Metro Line 1—6

1.2 变量选取

本次研究从时间维度上,划分工作日早晚高峰进站、出站客流四类作为因变量,选取可能影响客流分布的因素作为解释变量,分别构建时空影响分析模型。研究获取了西安市2021年12月工作日地铁AFC数据,包含IC编码、进出站信息等内容,完成数据清洗后,结合西安市轨道客流时间分布规律,识别7:00—8:00、17:00—18:00为早晚高峰,以站点为单位分别统计两个高峰的进、出站客流量。

在解释变量的选取,不同学者在构建站点客流影响因素集的分类方法上各有差异^[11],本文结合既有研究成果及数据获取情况,将影响因素分为三大类:建成环境及用地特征、交通接驳设施及站点自身属性。

建成环境及用地特征主要衡量站点影响范围内居住、岗位及不同类型用地的分布情况。居住及岗位指标上,采用高德LBS(Location Based Services)数据基于位置服务识别居民出行活动,划分居住和就业行为,基于各站点影响范围分类统计居住人口数和就业岗位数指标;各类型用地分布指标上,获取现状用地shp文件,分别统计各站点影响范围的公共服务、商业、居住及工业用地面积。

交通接驳设施主要衡量站点影响范围内的道路路网密度及公交线路情况^[5,8,11]。道路网数据通过Openstreetmap网站获取,公交线路通过爬取高德地图POI数据获取。

站点自身属性,站点与市中心距离、是否换乘站和是否端头站等特征对各站点的客流差异均有影响。对于前者,考虑到地理条件、客流及人口聚集度,确定钟楼作为市中心^[12],计算其与各

站点的距离表征站点区位优势, 后两者则作为哑元变量进行“0”或“1”赋值。

结合数据获取情况, 本文共提取 111 个站点为研究对象, 各变量的概括性统计如表 1 所示。

表 1 变量的概述性统计
Tab. 1 Summary statistics of variables

分类	变量名	简称	单位	均值	最大值	最小值	标准差
因变量	早高峰进站量	N_Amin	人	2 542.15	7 954	46	1 814.38
	早高峰出站量	N_Amout	人	2 563.23	9 643	222	2 174.09
	晚高峰进站量	N_Pmin	人	2 077.04	7 682	273	1 563.79
	晚高峰出站量	N_Pmout	人	2 070.89	6 566	46	1 422.81
建成环境及 用地特征	居住人口数	N_Pop	人	24 209	140 387	135	24 049.05
	就业岗位数	N_Job	个	22 545	146 982	69	23 838.31
	公共服务用地面积	$Land_A$	m^2	108 120.90	511 010.25	0	118 139.75
	商业用地面积	$Land_B$	m^2	121 533.10	672 368.56	0	109 456.18
	居住用地面积	$Land_R$	m^2	345 175.59	909 898.74	0	188 195.76
	工业用地面积	$Land_M$	m^2	53 798.02	557 330.61	0	114 652.98
交通接驳 设施	接驳公交线路数	$N_Busline$	条	19	52	1	9.23
	路网密度	D_Road	m/m^2	0.009	0.018	0.002	0.004
轨道站点 属性	与市中心距离	$Dist$	m	7 573.19	17 336.85	0	3 976.12
	是否端头站	$Terminal$	/	0.1	1	0	0.33
	是否换乘站	$Transfer$	/	0.05	1	0	0.21

2 变量检验及模型构建

2.1 变量相关性检验

首先采用全局莫兰指数(Global Moran's I)^[13]检验因变量及候选解释变量是否存在空间自相关性。结果如表 2 所示, 四个因变量的 z 得分均远超临界值 1.65, p 值低于 0.1, 在空间层面存在显著

的正自相关性。解释变量中, 商业用地面积($Land_B$)、是否端头站($Terminal$)、是否换乘站($Transfer$)的 z 得分及 p 值未通过检验, 空间相关性不显著, 因此被纳入全局变量; 其余解释变量的两个指标均通过检验, 具有显著的空间相关性, 被纳入局部变量。

表 2 变量空间自相关性检验结果
Tab. 2 Test results of spatial autocorrelation of variables

变量	$Moran's I$ 指数	期望指数	方差	z 得分	p 值
N_Amin	0.265 8	-0.009 1	0.003 6	4.580 6	<0.001
N_Amout	0.284 4	-0.009 1	0.003 6	4.904 7	<0.001
N_Pmin	0.307 9	-0.009 1	0.003 6	5.303 1	<0.001
N_Pmout	0.228 5	-0.009 1	0.003 6	3.953 3	<0.001
N_Pop	0.099 5	-0.009 1	0.003 3	1.878 0	0.06
N_Job	0.128 6	-0.009 1	0.003 2	2.415 7	<0.05
$Land_A$	0.487 1	-0.009 1	0.003 6	8.311 2	<0.001
$Land_B$	0.075 2	-0.009 1	0.003 4	1.445 9	0.15
$Land_R$	0.210 0	-0.009 1	0.003 6	3.646 0	<0.001
$Land_M$	0.202 7	-0.009 1	0.003 4	3.642 3	<0.001
$N_Busline$	0.441 0	-0.009 1	0.003 6	7.547	<0.001
D_Road	0.632 6	-0.009 1	0.003 6	10.651 4	<0.001
$Dist$	0.981 1	-0.009 1	0.003 6	16.416 2	<0.001
$Terminal$	0.013 5	-0.009 1	0.003 0	0.409 3	0.68
$Transfer$	-0.077 5	-0.009 1	0.003 5	-1.154 2	0.25

为进一步研究站点客流的局部差异性, 采用安瑟伦局部莫兰指数(Anselin Local Moran's I)对因变量进行局部自相关分析。由图 2 可知站点在空间层面存在聚集效应, 以早高峰出站客流为例,

高-高(H-H)聚集区主要分布于中心区域, 该范围区位优势较高, 用地及业态功能分布相对成熟, 因此站点客流效益好, 且更容易聚集; 低-低(L-L)聚集区主要位于外围区域, 受区位、用地成熟度

的影响, 该范围站点客流相对较低, 且较难聚集; 另外, 低-高(L-H)聚集区分布在 H-H 型和 L-L 型站点之间, 由于区位优势比 H-H 型站点差, 因此客流相对较低, 但相比 L-L 型站点, 客流聚集效应则相对较强. 另外, 考虑到所选变量可能存在多重共线问题, 对估计结果造成偏差, 采用皮尔逊(Pearson)相关系数识别变量间的共线性. 解释

变量中是否端头站(*Terminal*)与四个因变量的相关性均较低, 在 0.05 水平下不显著, 居住人口数(*N_Pop*)与就业岗位数(*N_Job*)的相关系数大于 0.7, 多重共线性较强, 因此剔除就业岗位数、是否端头站两个变量. 以早高峰出站客流为例, 利用方差膨胀因子(*VIF*)再次检验, 如表 3 所示, 各变量的 *VIF* 值均未超过 10, 通过显著性验证.

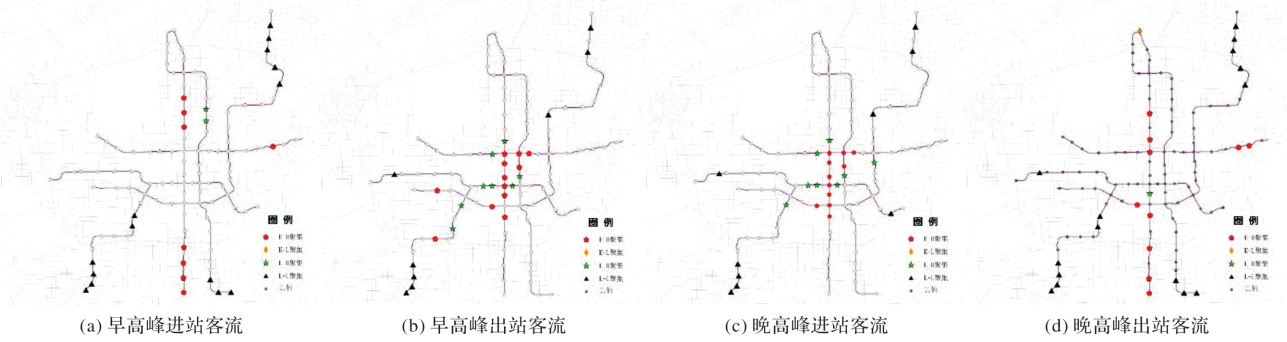


图 2 因变量局部自相关分析图
Fig. 2 Local autocorrelation analysis of dependent variables

表 3 多重共线性检验结果
Tab. 3 Multicollinearity test results

	<i>N_Pop</i>	<i>Land_A</i>	<i>Land_B</i>	<i>Land_R</i>	<i>Land_M</i>	<i>N_Bus</i>	<i>D_Road</i>	<i>Dist</i>	<i>Terminal</i>
<i>VIF</i>	1.665	1.389	1.246	1.684	1.261	2.033	2.405	2.471	1.267

2.2 模型对比及选择

多元线性回归是定量描述轨道站点客流影响因素最基本的模型之一, 通常采用最小二乘(OLS)模型进行参数估计, 计算公式为

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_{ij} x_{ij} + \epsilon_i \tag{1}$$

式中: y_i 为站点 i 的客流量(因变量); β_0 为模型截距; n 为站点影响因素(解释变量)个数; x_{ij} 、 β_{ij} 分别为站点 i 的第 j 个影响因素和对应的回归系数; ϵ_i 为误差项.

由于 OLS 模型假设各变量独立分布, 解释变量与因变量均为全局变量, 往往忽略了由于变量间的空间异质性所引起的局部变化^[14]. 而结合前文分析, 轨道站点客流及建成环境等影响因素在空间范围存在自相关性, 因此, 用全局模型解释性相对较差.

地理加权回归(GWR)模型考虑到变量的空间异质性, 在 OLS 模型的基础上将地理坐标纳入模型, 回归系数随站点位置的变化而改变, 使每个站点都有其独立的回归模型, 由于 GWR 模型允许局部参数估计, 也能更合理地解释一些变量的空间非平稳性特征, 计算公式为

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^n \beta_j(u_i, v_i) x_{ij} + \epsilon_i \tag{2}$$

式中: (u_i, v_i) 为站点 i 的地理坐标; u_i 为纬度;

v_i 为经度.

GWR 模型默认所有变量均为局部变量, 影响系数都随着空间位置的变化而改变, 过分强调了局部影响的重要性, 而实际上存在某些变量在全局范围系数变化不大, 空间相关性较弱. 因此, 相关学者在此基础上进行优化, 建立了同时包含局部变量和全局变量的混合地理加权回归(MGWR)模型^[15], 假设有 p 个全局变量, 模型计算公式为

$$y_i = \beta_0 + \sum_{j=1}^p \beta_j x_{ij} + \sum_{j=p+1}^n \beta_j(u_i, v_i) x_{ij} + \epsilon_i \tag{3}$$

MGWR 模型允许部分影响因素回归系数保持一致, 即认为该变量对客流的影响程度在整个区域没有变化; 而其他因素的回归系数在各站点间有所差异, 会随地理位置的变化而改变. 模型由线性回归和地理加权回归两部分构成, 回归拟合结果更符合实际^[6].

结合 2.1 分析结果, 本次研究所选的变量中, 全局变量(如是否换乘站等)和局部变量(如居住人口数等)同时存在, 因此, 为兼顾具备和不具备空间非平稳性的影响因素对轨道站点客流的影响, 本文将选择 MGWR 模型进行拟合, 为了进一步评价论证模型的解释能力, 同步构建 OLS 模型, 对比两个模型的拟合优度.

2.3 模型运算结果

使用 MGWR2.2 软件构建模型, 选择 Adap-

tiveBisquare 为空间核函数, Golden Section 搜索带宽^[16], 为消除不同量纲的影响, 采用 Z-score 进行变量标准化处理, 运行后得 MGWR 模型回归结果. 同时构建 OLS 全局模型进行对比, 两模型运算结果如表 4 所示. 以早高峰出站客流为例, MGWR 模型拟合优度 R^2 为 0.755, 相比 OLS 模型提高了约 20%, 残差平方和(RSS)和赤池信息量准则(AICc)均有所降低, 说明考虑变量空间相关性的 MGWR 模型能更准确地反映不同时段进出站客流与影响因素间的变化关系.

表 4 模型运算结果

Tab. 4 Model operation results

模型		RSS	AICc	R^2	$Adj. R^2$
早高峰	OLS	59.344	270.165	0.465	0.418
进站量	MGWR	34.077	255.934	0.693	0.598
早高峰	OLS	48.813	248.482	0.56	0.521
出站量	MGWR	27.193	228.767	0.755	0.682
晚高峰	OLS	36.6	216.518	0.67	0.641
进站量	MGWR	22.064	208.747	0.801	0.739
晚高峰	OLS	50.239	251.678	0.547	0.507
出站量	MGWR	27.623	240.156	0.751	0.666

对比各高峰时段进出站客流的 MGWR 拟合效果, 早高峰出站、晚高峰进站、晚高峰出站客流

的 R^2 均大于 0.7, 表明模型解释能力较强, 早高峰进站客流的 R^2 为 0.693, 解释力相对较弱, 这是就出行行为而言, 早高峰进站客流多来源于居住人口的通勤目的, 而由空间自相关分析可知, 居住人口分布在地理位置层面的差异相对较弱, 对客流的影响程度偏低.

3 时空影响因素分析

3.1 时间层面

经 MGWR 运行后各变量回归系数如表 5 所示, 由表可知, 不同变量对站点客流的影响程度有所差异. 整体而言, 公交线路数(N_Bus)、居住用地面积($Land_R$)、商业用地面积($Land_B$)对高峰客流均有显著影响, 公交线路数、是否换乘站与客流始终呈正相关, 而路网密度呈负相关, 说明从交通的角度而言, 公共交通间的接驳换乘对轨道交通出行选择有较大影响, 路网密度高的区域机动车出行概率高, 与轨道交通呈竞争关系, 影响站点客流; 工业用地面积($Land_M$)与客流呈负相关, 对轨道客流量起抑制作用. 此外, 其他变量对站点客流的影响随高峰时段和出行行为存在明显差异.

表 5 各变量回归系数表

Tab. 5 Regression coefficient of each variable

因变量	早高峰进站量				早高峰出站量			
	Mean	Min	Median	Max	Mean	Min	Median	Max
Intercept	0.288	-0.049	0.327	0.604	-0.086	-0.306	-0.076	0.038
N_POP	0.206	-0.05	0.212	0.647	-0.039	-0.265	-0.009	0.163
LAND_A	-0.115	-0.145	-0.112	-0.091	0.127	0.057	0.136	0.181
LAND_B	-0.273	-0.322	-0.281	-0.19	0.197	0.005	0.089	0.547
LAND_R	0.174	0.156	0.174	0.191	-0.07	-0.112	-0.068	-0.041
LAND_M	-0.131	-0.209	-0.128	-0.083	-0.101	-0.134	-0.098	-0.066
N_BUS	0.432	0.289	0.363	0.761	0.689	0.192	0.671	1.183
D_ROAD	-0.093	-0.122	-0.1	-0.052	-0.218	-0.227	-0.219	-0.208
DIST	0.235	-0.375	0.365	0.553	-0.124	-0.15	-0.126	-0.093
Transfer	0.003	-0.056	0.007	0.032	0.087	0.018	0.066	0.275

因变量	晚高峰进站量				晚高峰出站量			
	Mean	Min	Median	Max	Mean	Min	Median	Max
Intercept	-0.063	-0.071	-0.066	-0.04	0.137	-0.278	0.208	0.41
N_POP	0.007	-0.182	0.006	0.33	0.105	-0.22	0.161	0.452
LAND_A	0.246	-0.023	0.269	0.574	-0.026	-0.35	-0.01	0.293
LAND_B	0.239	0.106	0.26	0.33	-0.098	-0.112	-0.1	-0.078
LAND_R	-0.02	-0.045	-0.02	0.002	0.268	0.206	0.273	0.307
LAND_M	-0.076	-0.095	-0.076	-0.057	-0.107	-0.178	-0.105	-0.058
N_BUS	0.644	0.374	0.625	0.852	0.615	0.563	0.607	0.694
D_ROAD	-0.318	-0.394	-0.319	-0.225	-0.147	-0.168	-0.152	-0.117
DIST	-0.194	-0.216	-0.195	-0.162	0.206	-0.247	0.312	0.464
Transfer	0.11	0.008	0.098	0.354	0.08	-0.044	0.085	0.205

对早高峰而言,居住人口数(N_Pop)、居住用地面积与进站客流呈明显正相关,这与 2.3 的早高峰客流来源分析一致,为居住人口的通勤行为,居住用地为主要发生地;公服(Land_A)、商业用地面积与进站客流呈负相关,而与出站客流呈正相关,此类用地在早高峰时段多为居民轨道交通出行的吸引地。

对晚高峰而言,公服、商业用地面积与进站客流呈正相关,与出站客流呈负相关,居住用地的表现则恰好相反,说明晚高峰居民出行多为以公服、商业用地为发生地,居住用地为吸引居住人口数与进出站客流均成正比,这是由于晚高峰居民出行目的更加多样化,娱乐、游憩等行为的增加引起进出站客流的提高。

3.2 空间层面

由表 5 可知,不同站点间各变量的回归系数并不一致,为深入探讨各影响因素对客流作用强度的空间分布差异,将各变量的回归系数进行可视化表达,以早高峰为例,可视化结果如图 3 所示,进站客流中居住人口系数较高的站点集中在东部及南部郊区,达到 0.6 左右,西南部高新片区的影响系数相对较低;对出站而言,多数站点居住人口的回归系数为负,西南部系数绝对值相对较高,一定程度上反映了居住人口的早高峰通勤方向,东南地区为早高峰进站客流的主要发生点,轨道交通对西南部居住人口的吸引力偏弱。

公服用地组成主要为行政办公、教育用地等,为早高峰通勤的吸引地,该变量对进站客流的影响系数为负,多在 $-0.15 \sim -0.1$,对出站客流影响系数系数在 $0.05 \sim 0.18$;居住用地面积对站点客流的空間影响与居住人口数一致;工业用地面积对客流的影响指数偏低,且为负影响,因此,从提升客流效益的角度,建议未来用地规划中将站点周边工业类用地调出或升级为新型工业用地(M_0)。

公交线路数对进出站客流的影响系数均较高,但整体而言,系数较高的站点多位于外围地区,说明外围区域对常规公交接驳的需求更大,建议未来适当新增该区域的公交接驳设施。

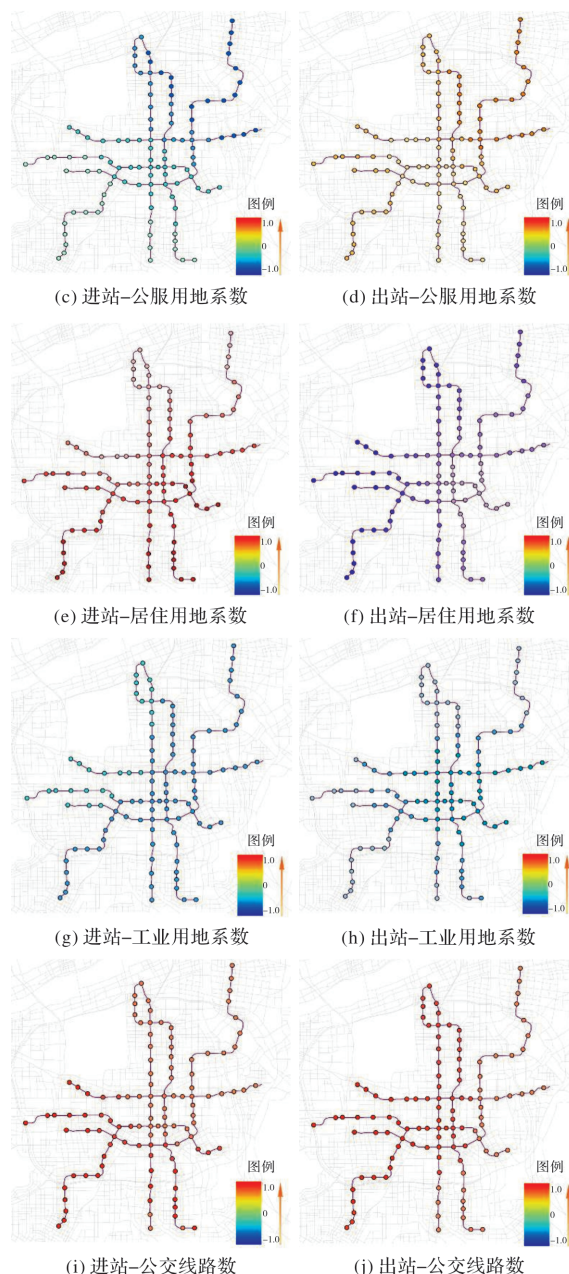
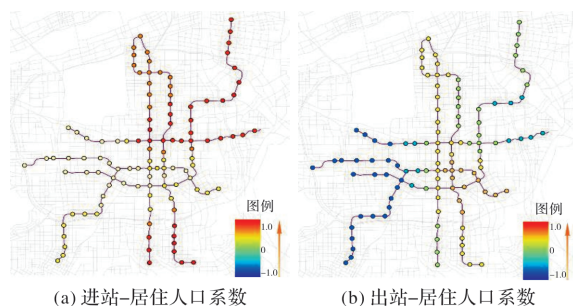


图 3 早高峰客流各影响因素系数分布

Fig. 3 Coefficient distribution of influencing factors for morning peak passenger flow

4 结论

本文基于地铁 AFC 数据及其他多源数据,以西安地铁 1—6 号线为例,探究高峰时段轨道站点客流的时空影响因素,在合理确定站点影响范围的基础上,提取相关数据构建 MGWR 模型进行研究。研究成果为轨道站点周边用地优化调整、交通设施衔接等提供参考。研究结果如下:

(1)受区位、用地及业态成熟度的影响,轨道站点客流在空间范围存在聚集效应,高-高(H-H)聚集区主要分布于中心区域,对比之下低-低(L-L)聚集区主要分布于外围区域;

(2)同传统的全局 OLS 模型相比, MGWR 模型考虑到变量的空间异质性, 降低结果偏差度, 拟合优度更高, 能更准确地反映不同时段进出站客流与影响因素间的变化关系;

(3)公交线路数、居住用地面积、商业用地面积对高峰时段进出站客流影响更显著, 公共交通的接驳换乘对客流起到促进作用, 路网密度、工业用地面积与客流呈反比; 居住人口的通勤行为影响进出站客流分布, 公服、商业用地面积与居住用地面积在高峰时段对客流的产生或吸引作用相反, 不同变量的回归系数随着高峰时段和出行行为的影响存在差异;

(4)各影响因素对站点客流的作用强度在空间分布上存在不同程度的差异, 东南部地区居住人口及居住用地面积的影响系数高, 西南部影响系数相对较低; 公服、商业用地面积对客流影响的空间差异相对较小; 工业用地面积的影响系数较低且为负值; 公交线路数对客流的影响系数较高, 外围区域接驳需求更大。

参考文献 References

- [1] SUNG H, OH J T. Transit-oriented development in a high-density city: Identifying its association with transit ridership in Seoul, Korea[J]. *Cities*, 2011, 28(1):70-82.
- [2] JUN M J, CHOI K, JEONG J E, et al. Land use characteristics of subway catchment areas and their influence on subway ridership in Seoul[J]. *Journal of Transport Geography*, 2015, 48(OCT.):30-40.
- [3] SOHN K, SHIM R. Factors generating boardings at Metro stations in the Seoul metropolitan area[J]. *Cities*, 2010, 27(5):358-368.
- [4] DING C, CHEN P, JIAO J. Non-linear effects of the built environment on automobile-involved pedestrian crash frequency: A machine learning approach[J]. *Accident; Analysis and Prevention*, 2018, 112:116.
- [5] 吕帝江. 基于多源地理大数据的地铁客流影响因素研究[D]. 广州:广州大学,2019.
LV Dijiang. Research on influencing factors of transit ridership based on multi-source geographic big data in Guangzhou[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019.
- [6] 彭诗尧. 基于土地利用的城市轨道交通客流时空特性分析[D]. 北京:北京交通大学,2020.
PENG Shiyao. Spatial and temporal characteristics analysis of urban rail transit passenger flow based on land use [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [7] El-Geneidy A, GRIMSRUD M, VVASFI R, et al. New evidence on walking distances to transit stops: identifying redundancies and gaps using variable service areas[J]. *Transportation*, 2014, 41(1):193-210.
- [8] 甘佐贤. 建成环境对城市轨道交通客流及出行特征的影响机理研究[D]. 南京:东南大学,2019.
GAN Xianzuo. Impact of built environment on the passenger flows and transfer behavior of urban rail transit [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [9] 王静,刘翔. 城市轨道沿线地区规划设计导则要点研究[J]. *山西建筑*,2017,43(4):35-37.
WANG Jing, LIU Xiang. Research on the Key points of the planning and design guidelines area along the urban rail[J]. *Shanxi Architecture*, 2017, 43(4):35-37.
- [10] 马莉. 城市轨道交通对住宅价格空间效应影响研究[D]. 西安:西安科技大学,2019.
MA Li. Research on Space Effect of Urban Rail Transit on Housing Value[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019.
- [11] 王剑坡. 城市轨道交通车站客流的影响因素时空异质性研究[D]. 西安:长安大学,2020.
WANG Jianpo. Study on the spatiotemporal heterogeneity of ridership determinants in urban rail transit stations[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [12] 米瑞华,石英. 基于常住人口分布的城市主副中心识别方法——以西安市为例[J]. *陕西师范大学学报(自然科学版)*,2014,42(3):97-102.
MI Ruihua, SHI Ying. Identifying method of CBD and sub-CBD based on the distribution of resident population: A case study of Xi'an city[J]. *Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition)*, 2014, 42(3): 97-102.
- [13] MORANP A P. Notes on continuous stochastic phenomena[J]. *Biometrika*, 1950,37(1-2):17-23.
- [14] 钟季汝. 城市建成环境对轨道交通客流特征影响研究[D]. 大连:大连理工大学,2019.
ZHONG Jiru. Study on the Impact of urban built environment on rail transit passenger flow [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [15] FOTHERINGHAM A S, YANG W, KANG W. Multiscale geographically weighted regression (MGWR)[J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2017, 107(6):1247-1265.
- [16] 刘潮汐. 徐州市地铁1号线对沿线住宅价格影响的空间效应研究[D]. 北京:中国矿业大学,2022.
LIU Chaoxi. Research on spatial effect of Xuzhou Metro Line 1 on the prices of nearby residence [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2022.

(编辑 沈波)